

Dinámica de fluidos computacional: una herramienta versátil para el desarrollo de la ciencia y la tecnología

Germán Alejandro Ibarra Bolaños¹

Ingeniero mecánico, Universidad del Valle

Cali, Colombia

Magister en Ingeniería de Energía, Universidade Federal de Itajubá

Itajubá, MG, Brasil

german.ibarra@correounivalle.edu.co

La mecánica de fluidos es una de las ramas de la mecánica clásica y concierne el estudio de fluidos, tanto en reposo (estática) como en movimiento (dinámica), así como de los efectos sobre sus alrededores. Sus aplicaciones se encuentran en diferentes áreas de la ciencia y la tecnología, tales como generación de energía, procesos térmicos, refrigeración y climatización, procesos químicos, combustión, turbomáquinas, estudios ambientales, industrias automotriz, aeronáutica y aeroespacial, análisis climáticos y meteorológicos, aplicaciones biomédicas y usos militares, flujos multifásicos y con superficie libre, transporte de partículas, por citar algunos. De ahí la relevancia y la necesidad de su estudio interdisciplinario.

Es importante recordar que las expresiones fundamentales de la mecánica de fluidos son tres: la ecuación de la continuidad, la ecuación de la cantidad de movimiento y la ecuación de la energía (ecuaciones de transporte). La segunda es de la cual se obtienen las conocidas relaciones de Navier-Stokes, ecuaciones diferenciales parciales no lineales y de segundo orden formuladas en el siglo XIX. No obstante, la aplicación directa de la teoría puede resultar tediosa debido las geometrías complejas y la viscosidad del fluido. En el primer caso, la dificultad está en que la relación velocidad-presión depende de cada geometría en estudio; por su parte, la viscosidad genera inestabilidades, aún con pequeñas velocidades que derivan en el fenómeno conocido como turbulencia, actualmente estudiado debido a su naturaleza irregular y tridimensional (tanto disipativa como

¹ Consultor en proyectos de energía renovable, principalmente relacionados con aprovechamientos hidroeléctricos de bajas caídas. También trabaja en el desarrollo e implementación de nuevas turbinas hidráulicas a partir de análisis teóricos, numéricos y experimentales

difusiva).

Como regla general, la teoría y la experimentación guardan una estrecha relación en la mecánica de fluidos. Esta última permite validar los modelos matemáticos formulados para un problema dado. No obstante, no siempre se cuenta con el tiempo y los recursos necesarios —económicos, tecnológicos y humanos— para realizar pruebas experimentales. Por lo tanto, es aquí donde surge la dinámica de fluidos computacional (*computational fluid dynamics*, CFD). La CFD posibilita realizar predicciones aproximadas del comportamiento del fluido utilizando técnicas numéricas y determinando variables de interés en dominio a escala real, con resolución espacial y temporal aceptables. Desde 1933², cuando se publicó la primera solución numérica aplicada a la dinámica de fluidos, el desarrollo de CFD ha sido notable; esto se ve reflejado en el número de programas comerciales disponibles actualmente y su capacidad para resolver una gran diversidad de problemas multifísicos.

En general, el análisis CFD se lleva a cabo en tres etapas: el preprocesamiento, el procesamiento y el posprocesamiento. En el primero se comienza por definir el dominio computacional o geometría de estudio. Luego, se genera la malla computacional —de forma estructurada o no estructurada— que representa la discretización espacial en volúmenes de menor tamaño llamados elementos. Para la forma estructurada se utilizan solamente elementos tipo hexaedro, mientras que en la no estructurada son empleados otros que permiten adaptar mejor el dominio computacional a cualquier geometría. El número de elementos dependerá de los fenómenos analizados tales como turbulencia, combustión, radiación, acústica, cambio de fase, entre muchos otros, cuyos modelos matemáticos son incluidos también en el preprocesamiento.

Todos estos modelos, junto con las ecuaciones fundamentales, son resueltos en cada elemento. Esto significa que, entre mayor sea el número de elementos, mayor será el recurso computacional requerido y el tiempo de procesamiento. El preprocesamiento termina al definir los fluidos utilizados, asignar las condiciones de frontera apropiadas —entradas, salidas, superficies, periodicidad, simetría, entre otras— y definir el tipo de análisis temporal —estacionario o transitorio—. La dependencia temporal ayuda a determinar, entre otras cosas, el modelo de turbulencia a ser utilizado para tener una

² Richard H. Pletcher, et al., *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 3rd ed. (Boca Raton, FL: CRC Press, 2012). Impreso.

representación razonable de las estructuras adoptadas por el flujo turbulento. Estas estructuras están compuestas en la realidad por remolinos de varios tamaños que interactúan entre sí, transfiriendo energía de los más grandes a los más pequeños. Este concepto se relaciona con las llamadas escalas de turbulencia.

Para fenómenos estacionarios, todas las ecuaciones son promediadas estadísticamente con respecto al tiempo. Es así como las ecuaciones de Navier-Stokes pasan a ser las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations*, RANS). Los modelos de turbulencia se basan en el concepto de la viscosidad turbulenta y pueden añadir ecuaciones de transporte. Como resultado, surgen varios modelos: *mixing length*, Spalart-Allmaras, κ - ε , κ - ω y Reynolds *stress model*, siendo κ la energía cinética turbulenta, ε la disipación viscosa y ω la tasa específica de disipación. Este tema es bastante amplio y de gran contenido conceptual y algebraico; se considera que es el más sencillo de todos los métodos para modelar la turbulencia.

La turbulencia es tratada de forma diferente en fenómenos transitorios. En el método LES (*large eddy simulation*), los remolinos más grandes se consideran una consecuencia directa de la geometría en estudio, mientras que los pequeños se estiman más generales. La selección se realiza con un filtro matemático de las ecuaciones de Navier-Stokes; de esta forma, los primeros se resuelven numéricamente sin modelos matemáticos mientras que los segundos sí utilizan un modelo llamado *subgrid-scale model*. Por su parte, en el método DNS (*direct numerical simulation*) todas las escalas de la turbulencia son resueltas numéricamente, sin modelos matemáticos. Estas técnicas, en especial DNS, requieren de un recurso computacional importante porque la discretización espacial y temporal debe ser pequeña para poder captar todos los fenómenos.

En la etapa del procesamiento se evidencia el trabajo elaborado e interesante de la CFD. Las complicadas ecuaciones diferenciales se convierten en sistemas de ecuaciones lineales y son resueltas con esquemas explícitos e implícitos. Lo importante es asegurar que los métodos numéricos utilizados sean los apropiados para el fenómeno estudiado. Todo esto suena tedioso, pero resulta interesante y gratificante.

Ya en el postprocesamiento, el profesional puede estar finalmente analizando la cavitación en una turbina hidráulica, la dispersión de contaminantes en ríos o en el ambiente, la relación entre la inhalación de diferentes partículas y las patologías respiratorias, la eficiencia de la combustión en lecho

fluidizado, la reducción de costos en fotobiorreactores para la producción de algas, el desempeño de un motor Stirling, el control predictivo de la temperatura de fusión en el moldeo por inyección de plástico, entre muchos otros.

Es por esto que las técnicas CFD son herramientas poderosas para el desarrollo. En Colombia se requieren cada vez más profesionales con conocimientos en estas áreas. Hoy por hoy, el uso de programas CFD se ha extendido debido a su popularidad. No obstante, es importante recordar que la CFD es solo un instrumento que ofrece soluciones aproximadas pero consideradas aceptables en ingeniería. Generalmente, los programas CFD en sí mismos no manifiestan si los datos de entrada están correctos; por esta razón, obtener soluciones acertadas será siempre el producto del conocimiento de los principios físicos involucrados. El empleo de esta herramienta se debe realizar de forma responsable y, en lo posible, intentando validar los resultados obtenidos. De lo contrario, se estaría dando la razón a sus detractores quienes, ante la gran cantidad de trabajos sin resultados confiables ,ya han comenzado a llamarla *color fluid dynamics*.